

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЕЩЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА МЕТЕОРИТА ЧЕЛЯБИНСК

© 2013 г. Э. М. Галимов, В. П. Колотов, М. А. Назаров, Ю. А. Костицын, И. В. Кубракова,
Н. Н. Кононкова, И. А. Рощина, В. А. Алексеев, Л. Л. Кашкаров,
Д. Д. Бадюков, В. С. Севастьянов

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН

119991, ГСП-1, Москва В-334, ул. Косыгина, 19

e-mail: galimov@geokhi.ru

Поступила в редакцию 20.03.2013 г.

Принята к печати 23.03.2013 г.

Представлены результаты минералогического, петрографического, элементного и изотопного анализа метеорита Челябинск и их геохимическая интерпретация. Показано, что метеорит относится к группе LL5 обыкновенных хондритов и характеризуется умеренной степенью ударного метаморфизма (S4). Метеорит Челябинск содержит значительное (около одной трети объема) количество ударно-расплавного материала. Этот материал по составу близок к основной части метеорита. Результаты изотопного анализа позволяют предполагать, что ударное событие в истории образования метеорита произошло приблизительно 290 млн. лет назад.

Ключевые слова: метеорит Челябинск, LL5-тип хондритов, элементный и минеральный состав метеорита Челябинск, ударное событие.

DOI: 10.7868/S0016752513070108

ВВЕДЕНИЕ

15 февраля 2013 г. мощный болид наблюдался многими жителями Курганской, Тюменской, Свердловской и Челябинской областей примерно в 9 ч 22 мин местного времени. Болид двигался в западном направлении, немного южнее г. Челябинск. Яркая вспышка и сильный взрыв имели место над пос. Депутатский, Еманжелинка и Первомайский примерно в 40 км южнее г. Челябинск. После взрыва очевидцы слышали несколько хлопков. Ударная волна выбила оконные стекла в Челябинске и окружающих населенных пунктах. Были повреждены здания машиностроительного и цинкового заводов и стадион. Осколками стекла ранено около 1500 жителей. Многочисленные метеоритные обломки выпали на снег и собирались местными жителями сразу же после взрыва в районе указанных выше населенных пунктов. Предполагается, что крупный кусок пробил лед озера Чебаркуль (70 км западнее Челябинска). Вокруг этой 8 м круглой полыньи были найдены мелкие осколки метеорита, но водолазы на дне озера ничего не смогли обнаружить из-за большого количества донного ила.

ГЕОХИ РАН 19.02.2003 направило в район падения экспедицию для сбора метеоритных фрагментов. В настоящей работе сообщаются результаты исследования собранного метеоритного вещества.

СБОР МЕТЕОРИТНЫХ ФРАГМЕНТОВ НА МЕСТЕ ПАДЕНИЯ

В ходе экспедиционных работ группа ГЕОХИ РАН обследовала главным образом район пос. Депутатский, Первомайский и Еманжелинка, в котором по сообщениям СМИ наблюдалось падения многочисленных обломков метеорита. Было установлено, что фрагменты метеоритного дождя выпадали на достаточно рыхлый снежный покров толщиной 50–70 см. с тонкой коркой наста наверху. Места падения легко опознавались по круглым отвесным отверстиям глубиной 10–30 см, далее переходящим в столбики смерзшегося снега (фирна) длиной 20–30 см (и более), на нижнем конце которых находились метеоритные обломки (рис. 1, 2). Проникновение в снег происходило без разрушения, т.е. все найденные образцы без исключения были представлены единичными экземплярами. Образцы сантиметровых размеров проникали в снежный покров на глубины 20–40 см, тогда как более крупные фрагменты находились непосредственно на поверхности мерзлого грунта. Оценки плотности выпадения в районе вышеуказанных поселков позволяют предполагать, что местными жителями могло быть собрано более 100 кг возможно, более 500 кг метеоритных осколков. При этом распределение метеоритных фрагментов по поверхности не является однородным, наблюдаются как пустые участки, так и области, обогащенные метеоритным веществом.

Размеры собранных фрагментов варьируют от 5 мм до примерно 10 см, главным образом 1–4 см. В основном наблюдались фрагменты изометричной или короткопризматической формы. Реже встречаются неправильные или уплощенные обломки. Все фрагменты полностью или частично покрыты корой плавления толщиной от долей до одного мм. Кора плавления черная, иногда с буроватым оттенком, в основном блестящая или слегка матовая. Редко наблюдаются экземпляры с буровато-коричневой толстой корой плавления, внешне напоминающей глиняную корку. На многих фрагментах присутствуют сколы без коры плавления. Во многих случаях на этих сколах под микроскопом наблюдаются нашлепки или шарики прозрачного коричневого стекла. Очевидно, что дробление с образованием сколов происходило еще во время пролета фрагментов в атмосфере со скоростями, недостаточными для образования коры плавления. В ряде случаев на коре плавления наблюдаются следы сдува расплава, образующие либо расходящиеся лучистые структуры, либо валки на тыльной стороне крупных обломков.

Всего группой ГЕОХИ РАН было собрано 464 экземпляра общей массой 3.66 кг. Описание исследованных фрагментов представлено в таблице 1.

МИНЕРАЛОГИЯ И ПЕТРОГРАФИЯ

Большая часть (2/3) собранных фрагментов состоит из светлого материала имеющего хондритовую структуру (рис. 3а). Такие фрагменты обычно рассечены тонкими темными прожилка-

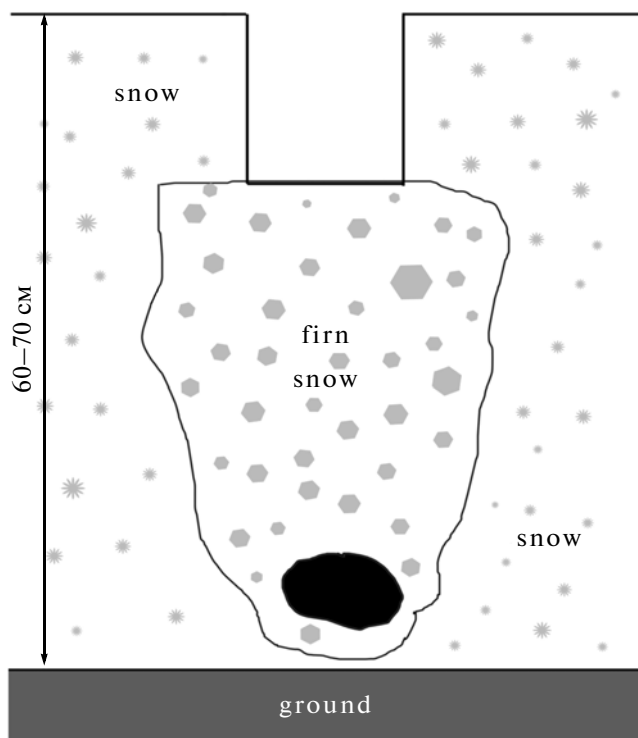


Рис. 1. Схема внедрения метеоритного фрагмента в снежный покров.

ми толщиной от долей мм до 1 мм, заполненными тонкозернистым ударным расплавом с мелкими минеральными обломками и тонко распыленным металлом и троилитом. На контактах прожилков

Таблица 1. Исследованные фрагменты метеорита Челябинск

№ образца	Описание	Вид исследования	Масса, г
78	Образец темного цвета (для анализа был размолот)	ИСП-МС, РФА	3.6
80	Образец светлого цвета (для анализа был размолот)	ИСП-МС, РФА	2.5
1	Образец светлого цвета (пластинка)	РФА	3
2-5	Образец светлого цвета (пластинка)	РФА	3
6-19	Образец темного цвета (пластинка)	РФА	1.5
75	Образец светлого цвета (полированный аншлиф)	Микрозонд, РФА	2.1
77	Образец светлого цвета (для анализа был размолот)	ИСП-АЭС, ЭТААС, СФМ	9.3
69	Образец темного цвета (для анализа был размолот)	ИСП-АЭС, ЭТААС, СФМ, CHNS, изотопия	5.6
2-6	Образец светлого цвета (пластинка)	Трековые исследования	2.3
65	Светлый	Изотопия (Rb-Sr, Nd-Sm)	35
2-7	Образец светлого цвета (пластинка). Основа для выбора минеральных фрагментов (табл. 10)	Изотопия (Rb-Sr, Nd-Sm)	—
65	Образец темного цвета	Изотопия углерода	5.6
66	Образец светлого цвета	Изотопия углерода	6.2



Рис. 2. Фотография, иллюстрирующая извлечение фирнового столбика с метеоритом (на фото рядом с образцом находится зажигалка для масштаба).

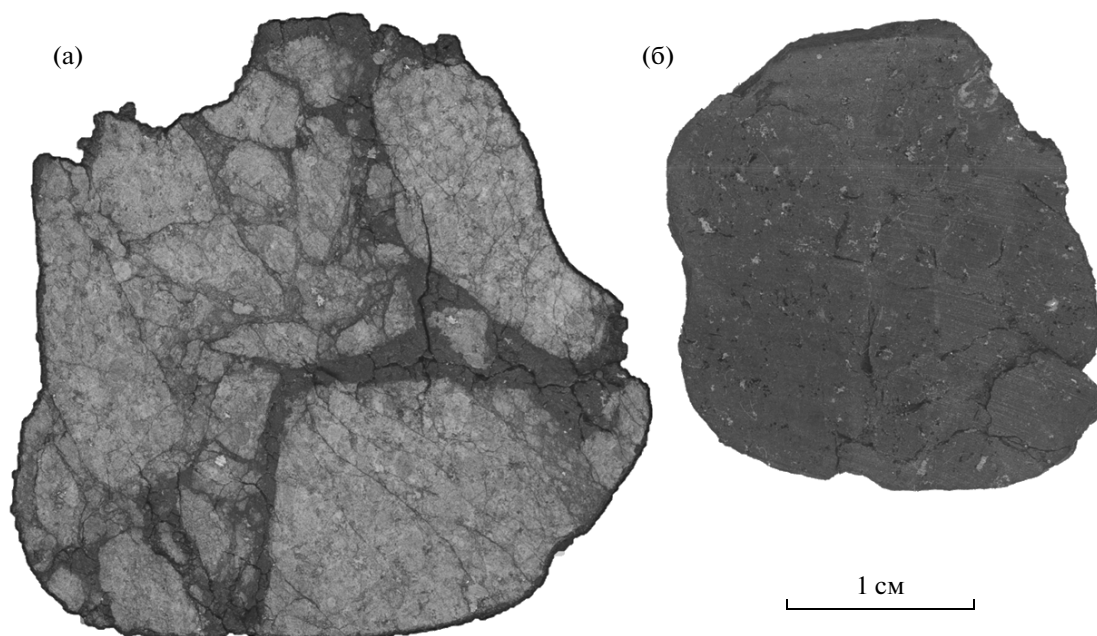


Рис. 3. Фрагменты метеорита Челябинск
а) светлая разновидность, б) темная разновидность.

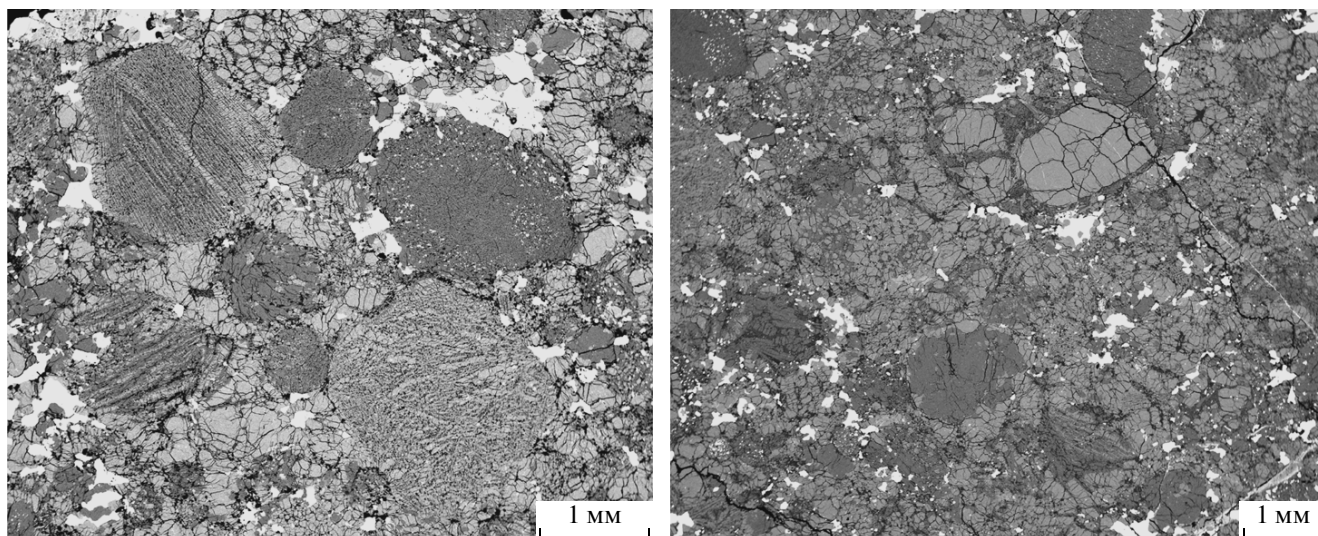


Рис. 4. Структура метеорита. Изображения в обратно-рассеянных электронах.

с матрицей отмечаются плоскости скольжения, что свидетельствует о фрикционном происхождении этого расплава. Хондры составляют примерно 60% и хорошо различимы в матрице, сложенной мелкими обломками хондр и обломками минеральных зерен (рис. 4). Средний размер хондр около 0.93 мм. Такие крупные хондры характерны для LL хондритов. Они в основном представлены колосниковыми и лучистыми разновидностями, реже встречаются порфиоровые хондры, которые обычно сильно перекристаллизованы. Хондры редко имеют округлые очертания, чаще их форма угловатая, очевидно, приобретенная в результате деформации и дробления. Хондровое стекло девитрифицировано с образованием мелкозернистых равномернозернистых агрегатов. Главные минеральные фазы оливин и ортопироксен. В оливине наблюдаются мозаичное погасание и планарные структуры, представленные системами параллельных трещин, на зерно приходится 1–2 системы, реже 3. Присутствуют единичные зерна авгита и клинобронзита, обладающего характерным полисинтетическим двойникованием. Маленькие (<50 мкм) ксеноморфные зерна полевого шпата (Ab 86) обычно имеют волнистое погасание и пониженное двупреломление, иногда содержат планарные элементы. Троилит (4 об. %) и FeNi металл (1.3 об. %) представлены выделениями неправильной формы и часто образуют сростки. На контактах троилита и металла иногда присутствуют мелкие включения самородной меди. Наблюдаются только незначительные следы поверхностного окисления металла.

Примерно треть собранных фрагментов состоит из ударно-расплавной брекчии (рис. 3б), состоящей из почерневших хондритовых обломков в тонкозернистой матрице. Темноцветные мине-

ралы хондритовых обломков рассеяны неправильными или плоскопараллельными (планарные структуры) трещинами, заполненными тончайшими прожилками троилита и металла, вызывающими общий черный цвет этих обломков. Отличительной особенностью ударного расплава является присутствие хорошо оформленного и полностью изотропного полевого шпата. В темных обломках, так же как и в светлых, присутствуют тонкие жилы ударного расплава, но, по-видимому, они пересекают только крупные хондритовые класты и не продолжают в тонкозернистую расплавную матрицу. Это может свидетельствовать о том, что они являются продуктами фрикционного плавления или инжектированным ударным расплавом. Расплавная матрица сложена идиоморфными зернами оливина микронных размеров, расположенных в криптокристаллической массе, в ней также присутствуют более крупные обломки зерен оливина. Фрагменты смешанного состава, т.е. состоящие из светлого и темного материала, редки. Это предполагает, что ударный расплав был представлен карманами и включениями в метеорите, и дробление метеоритного тела происходило по границам этих составляющих.

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ. МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Химический состав исследуемого метеорита определялся с использованием нескольких методов.

Микрозонд. SX100 CAMECA с четырьмя вертикальными спектрометрами использовался для рентгеноспектрального микроанализа состава минералов. Локальность метода 3 мкм, чувствительность 0.03 вес. %.

Предварительно, на хорошо отполированную поверхность для снятия статического электричества наносилась углеродная пленка. В качестве стандартных образцов состава выбирали минералы, схожие по составу с присутствующими в метеорите. Условия анализа: 15 кВ, ток зонда 30–50 нА, в зависимости от физико-химических свойств измеряемого минерала.

ИСП-МС. Определение химических элементов проводили методом ИСП-МС на спектрометре XSeries2 (ThermoFisher Scientific). Образцы светлой и темной компоненты метеорита (массой около 3 г) измельчали до порошкообразного состояния. Отбирали по две навески (100 мг) каждой пробы для кислотного разложения в открытой системе и в автоклаве (250 атм). После разложения проб проводили их разбавление и выполняли определение. В качестве стандартных образцов использовали базальт BHVO-2 (US Geological Survey) и метаморфический сланец ССЛ-1 (ГСО 3191-85), РФ. Определено около 60 элементов с пределом обнаружения 10^{-2} – 10^{-8} %. Выход РЗЭ контролировали по изотопным меткам.

РФА. Рентгенофлуоресцентный анализ осуществлялся на спектрометре “AXIOS Advanced” (фирмы “PANalytical B.V.”, Голландия). Исследовали три внешне различных образца: 1 – светлый, почти белый, с блестящими металлическими включениями и тонкими черными прожилками; 2–5 – светло-серый с блестящими металлическими включениями и многочисленными черными прожилками; 6–19 – темно-серый, почти черный, также с блестящими металлическими включениями. Исследуемые пробы не подвергались предварительной подготовке

к анализу и представляли собой пластины толщиной 1 мм, вырезанные из небольших штучных образцов. Были рассмотрены обе стороны (А и В), в центре пластин исследовались площадки диаметром 20 мм. Правильность определения концентрации Ni проверена по стандартному образцу состава SW. Для этих проб использовали программу полуколичественного анализа, основанную на измерениях интенсивности всех аналитических линий К- и L-серий спектра характеристического излучения пробы от кислорода до урана. Расчет концентраций проводился по методу фундаментальных параметров. Кроме того, проводили анализ порошковых проб темной и светлой компоненты метеорита. Пробы были приготовлены в виде таблеток диаметром 20 мм, в качестве связующего вещества использован эмульсионный полистирол (С8Н8) в количестве 0.06 г. В пробе светлой компоненты обнаружены твердые шарики металлической фазы, которые были запрессованы вместе с основной массой пробы в изготовленную таблетку. Интенсивности аналитических линий были измерены по 3 раза с обеих сторон изготовленных таблеток. Расчет концентраций элементов проводили по количественной программе анализа. Результаты анализа стандартных образцов состава SW и ООКО 201 служили основой оценки правильности метода.

АЭС-ИСП. Атомно-эмиссионная спектроскопия с индукционно связанной плазмой применялась для исследования основных элементов и микрокомпонентов, включая определение благородных металлов. Для анализа спектрофотометрическим методом использованы образцы весом 5.6 г и 9.3 г, представляющие соответственно тем-

Таблица 2. Состав минеральных фаз метеорита Челябинск

Компонент	Оливин	Ортопироксен	Плагиоклаз	Хромит
SiO ₂	38.3	55.4	68.3	0.05
TiO ₂	н.о.	0.21	0.05	2.94
Al ₂ O ₃	н.о.	0.16	20.0	5.96
Cr ₂ O ₃	0.03	0.15	н.о.	54.32
FeO*	24.7	14.9	0.48	32.07
MnO	0.45	0.47	н.о.	0.64
MgO	35.8	27.7	н.о.	1.86
CaO	0.06	0.66	0.85	н.о.
Na ₂ O	н.о.	0.14	9.61	н.о.
V ₂ O ₃	н.о.	н.о.	н.о.	0.94
Сумма	99.3	99.8	99.3	98.8
Fa/Fs/Ab	27.9	22.8	95.3	—

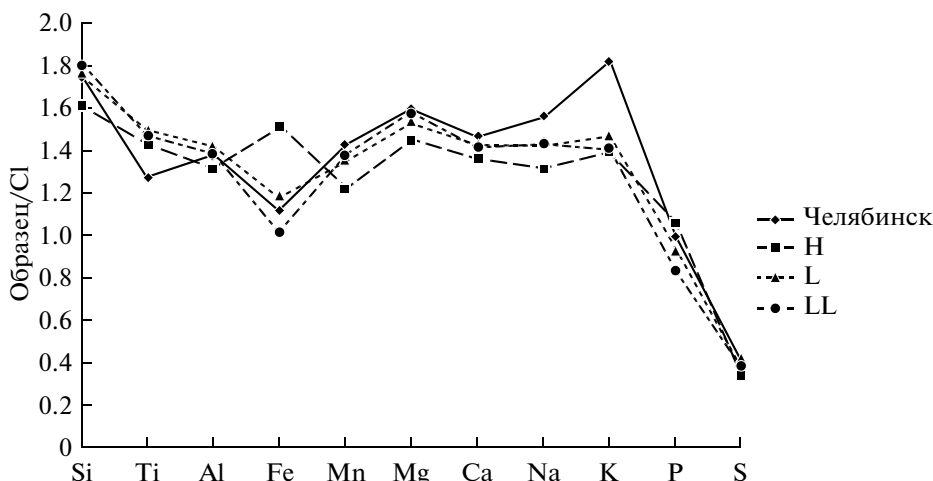


Рис. 5. Содержание основных элементов в метеорите Челябинск, приведенное к содержанию в CI-хондритах, в сравнении с обыкновенными хондритами типов H, L и LL.

ную и светлую составляющие метеорита. Образцы измельчали в агатовой ступке. Кремний, железо и алюминий определяли из растворов спектрофотометрическим методом (спектрофотометр UV-1800 Shimadzu). Для этого навеску массой 0.1 г (3 параллельных) сплавляли с бурой и содой, а затем растворяли в растворе соляной кислоты. Для определения концентраций Na, K, Ca, Mg, Fe, Al, Mn, P и Ti навеску массой 0.1 г (3 параллельных) растворяли в HF, HNO₃ и HCl и затем раствор анализировался методом АЭС-ИСП (спектрометр Iris Intrepid duo, Thermo Electron Corp.). Этим же методом в растворе определяли содержания Ni, S, Cr, Cu, Co, Zn, Ba, Sc, Sr, V, Y, Mo, Pb, Ag. Для приготовления раствора навеску массой 1 г (3 параллельных) обрабатывали HF + HNO₃, HCl + HNO₃, HCl. Остаток сплавляли с перекисью натрия. Из этого же раствора после концентрирования определяли Au, Pd, Pt, Ir методом ЭТААС (спектрометр Solaar MQZ, Thermo Electron Corp.).

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ МИНЕРАЛОВ

Химический анализ минеральных фаз определяли с помощью микронзонда. Усредненный состав отдельных минеральных фаз показан в табл. 2. Табл. 3 включает все определения и позволяет оценить однородность состава минеральных фаз.

ПОРОДООБРАЗУЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Определение основных породообразующих элементов выполняли с использованием нескольких методов. В табл. 4 сведены данные, вычисленные как среднее из результатов, полученных разными методами.

Табл. 5 представляет сравнение химического состава метеорита Челябинск с метеоритами других типов. Существует достаточно очевидное сходство состава исследуемого метеорита с обыкновенными хондритами типов L и LL.

Наглядно это демонстрируется результатами факторного анализа (табл. 6). По составу породообразующих элементов хондриты LL- и L-типов характеризуются высокими коэффициентами корреляции (0.99). Исследованный метеорит Челябинск с высоким коэффициентом корреляции (0.94) принадлежит к одной из этих групп. Низкое содержание металлического железа позволяет уверенно отнести метеорит Челябинск к LL-группе.

На рис. 5 видно, что характер распределения элементов в метеорите Челябинск согласуется с таковым для породообразующих элементов метеоритов L- и LL-типов. Исследованный метеорит показывает увеличенное содержание калия. Наблюдение следует считать достоверным, поскольку оно подтверждается данными, полученными разными методами.

В табл. 7 приведены содержания главных элементов в светлой и темной компоненте метеорита Челябинск. Они практически не различаются и хорошо соответствуют среднему составу падений LL хондритов [2] (Jarosewich, 1990). Темная компонента (ударный расплав), обладает, однако, несколько большими содержаниями Al, K и меньшими Ca. Диагностическое значение для определения типа метеорита имеет содержание Fe_{мет}. В светлой компоненте оно определено на основе модальных подсчетов количества металлической фазы (2.9 мас. %), что за вычетом Ni и Co дает содержание Fe_{мет} 1.74 мас. %. Эта модальная оценка может быть несколько занижена из-за пропуска при модальном анализе мелких зерен металла. Если оценить содержание окисного железа, исхо-

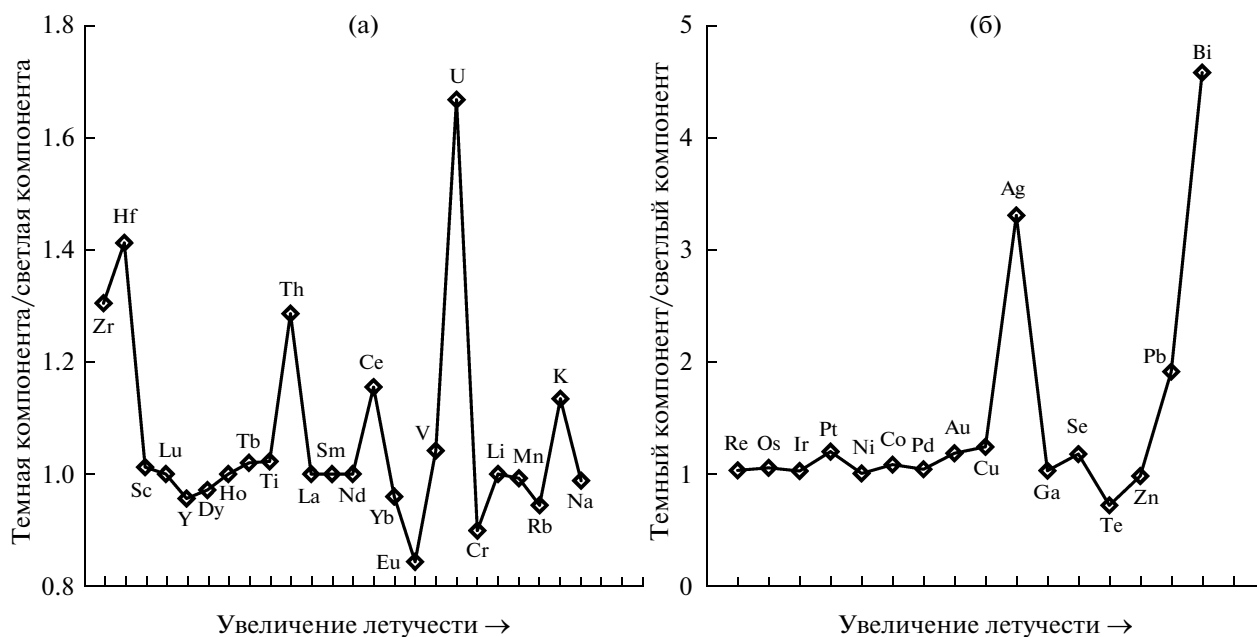


Рис. 6. Содержание редких элементов в метеорите Челябинск в порядке увеличения летучести: а) литофильные элементы в темной фракции по отношению к светлой; б) сидерофильные и халькофильные элементы в темной фракции по отношению к светлой.

да из Fe/Mg отношения в оливине и валовом содержании MgO, то получим FeO 17.9 мас. % и Fe_{мет} – 2.04 мас. %. Такая оценка Fe_{мет} тоже может быть несколько заниженной, поскольку пироксен имеет более низкое отношение Fe/Mg по сравнению с оливином и, следовательно, валовое отношение Fe/Mg должно быть также меньше, чем в оливине. Если же исходить из Fe/Ni отношения в металлической фракции (3.9 с учетом коррекции на присутствие в этой фракции FeO и FeS) и валовом содержании Ni, то Fe_{мет} составит 4.25 мас. % а FeO 14.9 мас. %. Эта оценка Fe_{мет}, напротив, может быть несколько завышенной, поскольку S обычно теряется в ходе кислотного разложения образцов. Однако все эти оценки находятся в пределах вариации содержаний Fe_{мет} в LL хондритах. Оценки содержания Fe_{мет} в темной компоненте основываются на величине Fe/Mg отношения в светлой части, поскольку присутствие в ударном расплаве множества мелких зерен металла составляет трудности для определения его количества модальным анализом. Вероятно, однако, что в ударном расплаве содержание металлической фазы несколько выше.

По сравнению со средним нормативным составом падений LL хондритов, метеорит Челябинск характеризуется отчетливо повышенным содержанием оливина и более низким ортопироксена, что связано с несколько более низкой концентрацией Si в изученных образцах. Эта особенность наблюдается как для светлой, так и для темной составляющей метеорита (табл. 7).

МЕТАЛЛИЧЕСКАЯ ФАЗА

Состав металлической фазы, выделенной магнитом из измельченной пробы, приведен в табл. 8.

СОДЕРЖАНИЕ РЕДКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Содержание редких элементов приведено в табл. 9. В основном ударный расплав не отличается от хондритовой компоненты по концентрациям большей части редких элементов (табл. 9). Среди литофильных элементов (рис. 6) ударный расплав в 1.2–1.7 раза богаче Zr, Hf, Th, Ce, U (4-х валентные элементы, включая Ce в окисленном состоянии) и K, и немного беднее Eu. Для некоторых сидерофильных и халькофильных элементов (рис. 6б) наблюдаются более существенные различия. Так ударный расплав в 1.5–2.5 раза обогащен Se, Pb и в 3.5–5 раз Ag и Bi. Все эти элементы являются легко летучими халькофилами. Возмещение обогащение ударного расплава металлической фазой находит только слабое отражение в концентрациях типичных сидерофилов (Ni, Co, Au, платиноиды).

Рисунок 7 иллюстрирует распределение редкоземельных элементов в метеорите Челябинск (нормированное к CI-хондритам) в сравнении с другими типами обыкновенных хондритов.

Две особенности метеорита Челябинск обращают на себя внимание: 1 – тренд к увеличенному содержанию тяжелых РЗЭ. 2 – повышенное содержание Eu.

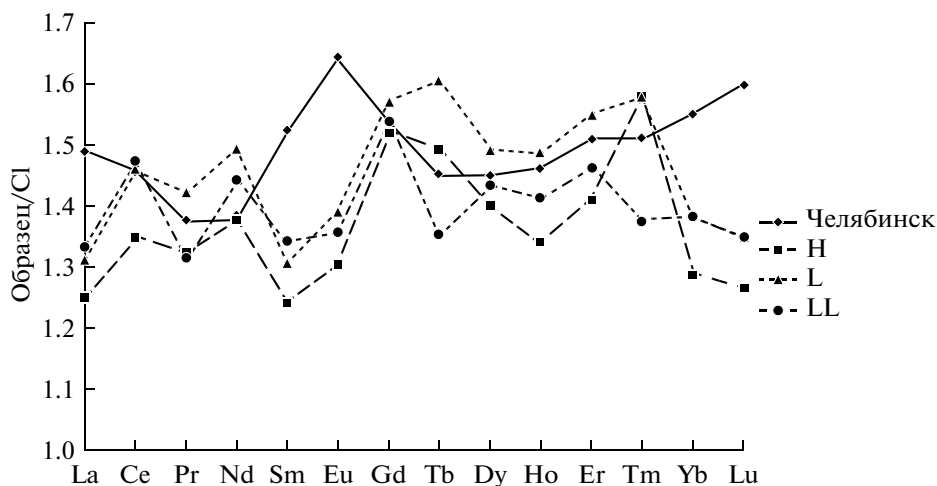


Рис. 7. Содержание редкоземельных элементов в метеорите Челябинск, нормированное к содержанию в CI-хондритах, в сравнении с обыкновенными хондритами типов H, L и LL.

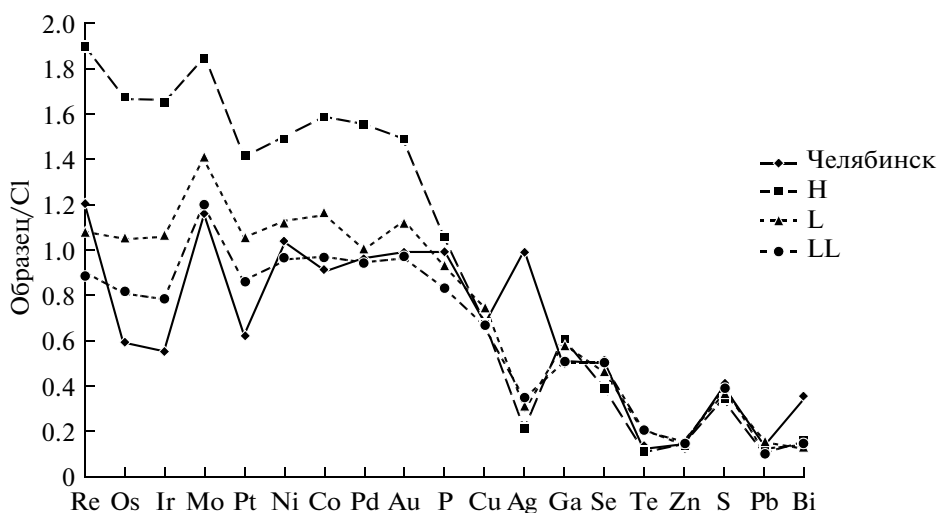


Рис. 8. Содержание сидерофильных и халькофильных элементов в светлой компоненте метеорита Челябинск, нормированное к содержанию в CI-хондритах, в сравнении с обыкновенными хондритами типов H, L и LL. Данные по хондритам из работы [1].

В распределении сидерофильных элементов (рис. 8) особенностью метеорита является низкое содержание рефракторных платиноидов (Ir, Os, Pt), даже по сравнению с LL-хондритами, которые обеднены платиноидами. Как и все обыкновенные хондриты Челябинск обладает четким дефицитом летучих халькофильных и сидерофильных элементов (рис. 8).

Sm/Nd И Rb/Sr СИСТЕМЫ

Исследования Rb—Sr и Sm—Nd изотопных систем были проведены в ГЕОХИ РАН на масс-

спектрометре TRITON. Концентрацию Rb, Sr, Sm, Nd определяли методом изотопного разбавления. Образцы, растертые до состояния тонкой пудры, разлагали в тефлоновых капсулах в 1 мл смеси HF + HNO₃ при атмосферном давлении в течение 3 суток на шейкере при температуре около 100°C. До разложения к образцу добавляли аликвоты смешанных трасеров ⁸⁵Rb + ⁸⁴Sr и ¹⁴⁹Sm + ¹⁵⁰Nd. Фториды отгоняли трехкратным выпариванием в 1 мл 12 N HCl. Центрифугирование растворов после этой процедуры разложения показало отсутствие видимого осадка во всех образцах. Выделение Rb, Sr и суммы редких земель проводили методом

Таблица 3. Химический анализ минеральных фаз исследованных образцов метеорита Челябинск в разных локальностях

Оливин									
SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Total	
38.17	0	0	0.01	24.66	0.46	35.8	0.12	99.22	
38.4	0.01	0	0.01	24.96	0.49	35.05	0	98.92	
38.08	0.01	0	0.02	24.69	0.47	35.36	0.09	98.72	
38.33	0	0.03	0.01	24.39	0.46	35.58	0.12	98.92	
38.63	0	0	0.04	24.97	0.46	35.96	0.11	100.17	
38.23	0.02	0	0	25.32	0.44	35.44	0.02	99.47	
38.87	0.03	0	0.02	25.02	0.5	36.03	0.12	100.59	
38.74	0.02	0	0.01	24.9	0.46	35.35	0.07	99.55	
38.43	0.04	0	0.07	24.64	0.44	35.95	0	99.57	
37.92	0.02	0	0.02	24.54	0.49	36.09	0.05	99.13	
37.92	0	0	0	24.47	0.44	35.96	0.03	98.82	
37.93	0	0.04	0.08	24.36	0.45	35.78	0	98.64	
38.02	0	0	0.1	24.52	0.45	36.18	0.09	99.36	
38.54	0.01	0.04	0.02	24.37	0.44	36.11	0	99.53	
38.69	0.01	0	0	24.44	0.47	35.54	0	99.15	
37.45	0.01	0	0.01	24.66	0.44	36.63	0.1	99.3	
38.1	0	0.02	0.01	24.2	0.45	35.65	0	98.43	
38.35	0	0.03	0	24.5	0.46	35.76	0	99.1	
37.57	0	0	0.04	24.75	0.4	35.46	0.1	98.32	
38	0	0	0	24.43	0.45	35.81	0.02	98.71	
38.39	0.01	0	0.08	25.43	0.44	36.49	0.11	100.95	
38.67	0.01	0.04	0.02	25.47	0.46	35.78	0.12	100.57	
Пироксен									
SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	Total
55.58	0.2	0.18	0.15	14.47	0.46	28	0.43	0	99.47
55.22	0.16	0.1	0.12	15.43	0.43	28.07	0.75	0	100.28
55.65	0.15	0.14	0.08	14.74	0.5	28	0.44	0.08	99.78
56.35	0.18	0.18	0.07	14.37	0.45	27.25	0.45	0.3	99.6
52.69	0.17	0.04	0.1	17.37	0.53	28.58	0.65	0.22	100.35
56.29	0.22	0.23	0.15	14.61	0.47	28.13	0.66	0	100.76
55.8	0.2	0.14	0.1	14.59	0.47	27.14	0.76	0.17	99.37
68.27	0.05	20.03	0	0.48	0	0	0.85	9.61	99.29
66.01	0.05	22.41	0.2	0.74	0	0.18	0.84	0.59	91.02
55.86	0.2	0.11	0.07	14.47	0.49	27.8	0.51	0.22	99.73
55.18	0.15	0.1	0.09	14.25	0.49	27.72	0.58	0	98.56
55.6	0.17	0.21	0.1	14.04	0.45	27.71	0.8	0.14	99.22
55.24	0.2	0.13	0.11	14.75	0.46	27.77	0.74	0.38	99.78
55.49	0.18	0.15	0.1	14.69	0.45	27.56	0.77	0.29	99.68
55.32	0.42	0.43	0.29	14.73	0.43	26.67	0.71	0.09	99.09
53.9	0.23	0.2	0.4	10.45	0.36	22.73	14.09	0.09	102.45
55.82	0.17	0.04	0.12	14.44	0.45	27.48	0.67	0.15	99.34
54.73	0.34	0.21	0.74	14.9	0.45	28.15	0.7	0.18	100.4
55.35	0.26	0.16	0.13	15.37	0.47	26.83	0.82	0	99.39
55.5	0.14	0.1	0.08	15.32	0.53	27.46	0.79	0.11	100.03
68.48	0.04	22.92	0.01	0.51	0.02	0.03	1.44	6.2	99.65
66.93	0.03	21.62	0	0.5	0.02	0.05	2.44	8.12	99.71
0.06	2.67	6.28	56.67	30.23	0	1.78	0	0.01	97.7

Таблица 3. Окончание

Хромит									
TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CoO	V ₂ O ₃	ZnO	Total
2.96	6.08	54.6	32.33	0.69	1.79	0.26	0.95	0	99.67
2.41	6.21	54.05	31.68	0.49	1.77	0	0.96	0.31	97.89
2.86	5.99	54.01	32.33	0.72	1.73	0	1.01	0.35	99.0
2.26	6.36	55.02	32.34	0.65	1.63	0.19	0.88	0.52	99.85
2.78	6.1	54.45	32.16	0.6	2.06	0.23	0.91	0.41	99.71
3.18	5.78	54.32	31.92	0.56	1.96	0.3	0.97	0.5	99.5
2.63	6	54.69	31.58	0.71	1.72	0	1.05	0.2	98.67
3.8	5.39	54.09	32.21	0.78	2.0	0.2	0.9	0	99.36
3.54	5.76	53.65	32.04	0.59	2.06	0.22	0.82	0	98.68

ионообменной хроматографии на фторопластовых колонках с 3.5 мл смолы Dowex 50 × 8. В качестве элюента использовали 2.2 N HCl. Выделение Nd и Sm проводили на колонках Eichrom Ln.spc со ступенчатым элюированием 0.15 N, 0.30 N и 0.70 N HCl. Воспроизводимость изотопного анализа контролировалась по международным стандартам SRM-987 для Sr и JNdi-1 для Nd. В качестве погрешностей в таблице указаны 95%-ные доверительные интервалы. Погрешности определения Rb/Sr и Sm/Nd отношений отвечают 1% и 0.1% соответственно. Количество элементов в холстом опыте оказалось следующим: Rb – 27 пг, Sr – 180 пг, Sm – 5 пг, Nd – 18 пг, поправки на холстой во всех случаях оказались пренебрежимо малы.

Для анализа были использованы два фрагмента – отпиленный кусок весом 34.85 г и отпиленная от него же пластина толщиной ~2 мм. Более крупный фрагмент, включающий прожилки ударного расплава, был раздроблен в ступке Аби-ха до размерности –0.1 мм и от этого материала была взята аликвота породы в целом. Остальной материал был отмыт от мелкой пыли, освобожден от металла с помощью ферритового магнита и разделен в иодистом метиле на две фракции – легкую и тяжелую. Каждая из них затем была разделена с помощью сильного постоянного NdFeB-магнита на немагнитную и слабомагнитную фракции. Таким образом были приготовлены для исследования порода в целом (TR1 в табл. 10), легкая немагнитная (LN), легкая слабомагнитная (LM), тяжелая немагнитная (HN) и тяжелая слабомагнитная (HM) фракции. Такой подход мы вынуждены были применить поскольку метеорит обладает мелкозернистой структурой и из такого материала невозмож-

но выделить чистые минеральные фракции. Исследования минеральных фракций с помощью микросонда показали, что все они содержат полный набор минералов метеорита.

Кроме того, из пластины были механически выделены фрагменты породы в целом, свободные от прожилков ударного расплава (TR0) и материал прожилков серого ударного расплава (GG) мощно-

Таблица 4. Содержание основных породообразующих элементов метеорита Челябинск (среднее по результатам анализа светлой и темной компоненты)

Элемент	Содержание, %	Метод анализа*
Si	18.3	P, A
Ti	0.054	M, A
Al	1.18	M, A
Fe	20.3	A, P
Mn	0.27	M, A, P
Mg	15.5	A, P
Ca	1.35	M, A, P
Na	0.76	M, A
K	0.10	M, A
P	0.10	M, A, P
S	2.38	M, A, P, CHNS
O	37.4	P

* M-МС ИСП; A-АЭС ИСП; P-РФА, CHNS-анализ.

Таблица 5. Составы метеорита Челябинск и других типов хондритов, нормированные к составу CI-хондритов*

Элемент	Челябинск	СМ	СО	CV	Н	L	LL	ЕН	EL
Si	1.743	1.229	1.514	1.486	1.610	1.762	1.800	1.590	1.771
Ti	1.273	1.381	1.857	2.333	1.429	1.500	1.476	1.071	1.381
Fe	1.115	1.154	1.363	1.291	1.511	1.181	1.016	1.593	1.209
Mn	1.422	0.526	0.789	0.763	1.221	1.353	1.379	1.158	0.858
Al	1.374	1.372	1.663	2.035	1.314	1.419	1.384	0.942	1.221
Mg	1.594	1.206	1.495	1.495	1.443	1.536	1.577	1.093	1.454
Ca	1.467	1.380	1.717	2.065	1.359	1.424	1.413	0.924	1.098
Na	1.554	0.837	0.837	0.673	1.306	1.429	1.429	1.388	1.184
K	1.825	0.714	0.616	0.554	1.393	1.473	1.411	1.429	1.313
P	0.991	0.882	1.020	0.971	1.059	0.931	0.833	1.961	1.147
S	0.403	0.559	0.339	0.373	0.339	0.373	0.390	0.983	0.559

* Данные по хондритам из работы [1].

Таблица 6. Корреляция содержания породообразующих элементов метеорита Челябинск с метеоритами других типов (факторный анализ)

Метеорит	Челябинск	СМ	СО	CV	Н	L	LL	ЕН	EL
Челябинск	1.00	0.34	0.43	0.33	0.87	0.94	0.94	0.25	0.78
СМ	0.34	1.00	0.95	0.93	0.58	0.52	0.49	-0.12	0.59
СО	0.43	0.95	1.00	0.97	0.68	0.63	0.60	-0.04	0.64
CV	0.33	0.93	0.97	1.00	0.56	0.54	0.51	-0.18	0.51
Н	0.87	0.58	0.68	0.56	1.00	0.92	0.87	0.37	0.87
L	0.94	0.52	0.63	0.54	0.94	1.00	0.99	0.19	0.85
LL	0.94	0.49	0.60	0.51	0.87	0.99	1.00	0.09	0.81
ЕН	0.25	-0.12	-0.04	-0.18	0.37	0.19	0.09	1.00	0.48
EL	0.78	0.59	0.64	0.51	0.87	0.85	0.81	0.48	1.00

стью 1–2 мм, а также ударный расплав, представленный более массивными скоплениями (BG).

Весь материал, приготовленный к изотопному анализу, был истерт в агатовой ступке в мелкую пудру.

Результаты изотопных исследований приведены в табл. 10 и на рис. 9. Как видно на рис. 9а, в Sm–Nd системе результаты анализа образуют линейный тренд, наклон которой отвечает

~290 млн. лет, $\epsilon_{Nd}(T) \approx -1.1$. Узкие пределы фракционирования Sm/Nd отношения и небольшие вариации изотопного состава неодима не позволили получить изохрону в строгом ее значении, но позволяют приблизительно оценить возможное время проявления события, вызвавшего заметное преобразование Sm–Nd системы. Состав черного ударного расплава (BG) близок к валовому составу (TR1) метеорита, тогда как точка, отвечающая прожилку серого расплава (GG), наи-

Таблица 7. Содержание главных элементов в светлой и темной фракции метеорита Челябинск (мас. %)

Элемент	Светлая (главная) компонента	Темная компонента (ударный расплав)	LL хондриты
SiO ₂	39.3	39.0	40.60 (0.54)
TiO ₂	0.089	0.091	0.13 (0.02)
Al ₂ O ₃	2.34	2.47	2.24 (0.08)
Cr ₂ O ₃	0.58	0.64	0.54 (0.03)
FeO	18.2*	17.9***	17.39 (2.06)
MnO	0.34	0.34	0.35 (0.02)
MgO	25.8	25.4	25.22 (0.44)
CaO	1.95	1.92	1.92 (0.11)
Na ₂ O	1.03	1.01	0.95 (0.06)
K ₂ O	0.12	0.13	0.10 (0.02)
P ₂ O ₅	0.23	0.24	0.22 (0.04)
Fe _{мет}	1.74**	2.60****	2.44 (1.61)
Ni	1.11	1.15	1.07 (0.13)
Co	0.046	0.051	0.05 (0.01)
FeS	6.32	6.60	5.79 (1.04)
Сумма	99.19	99.54	99.01
Fe _{общ}	19.9	20.7	19.63 (0.68)

Нормативный состав (мас. %)

Оливин	60.7	58.9	51.8
Ортопироксен	11.9	12.7	21.6
Клинопироксен	5.7	5.1	5.4
Плагиоклаз	10.9	11.2	10.2
Апатит	0.5	0.5	0.5
Хромит	0.9	1.0	0.8
Ильменит	0.2	0.2	0.3
Троилит	6.3	6.6	5.8
Металл	2.9*****	3.8	3.6

Примечания. * Рассчитано исходя из Fe_{общ}, сульфидного Fe и Fe_{мет}; ** рассчитано исходя из модального содержания металла. *** рассчитано при Fe/Mg отношении, таком же как и в светлой части; **** рассчитано исходя из Fe_{общ}, сульфидного и окисного Fe; ***** модальная оценка содержания металла по 3 шлифам.

В скобках указано стандартное отклонение.

более аномальна. По-видимому, образование черного ударного расплава происходило в результате валового плавления вещества метеорита, тогда как формирование прожилков сопровождалось частичным плавлением и элементным фракционированием вещества.

В Rb–Sr системе, несмотря на значительные вариации содержания рубидия и стронция в разных фракциях (см. табл. 10) размах вариаций Rb/Sr отношения, оказался еще более узким, точки (рис. 9б) образуют почти изометричное облако.

Таблица 8. Состав металлической фазы метеорита Челябинск

Мас. %							
Fe	Ni	Co	Mg	S	Cu	P	Ga
73.1	18.3	1.5	0.58	0.33	0.11	0.04	0.0033
мкг/г							
Zn	Ag	Pt	Pd	Ti	Ir	Sr	Au
21.3	14.5	14.3	10.8	6.4	5.22	5.0	2.62

Таблица 9. Содержание редких элементов в метеорите Челябинск (мкг/г)

Элемент	Метеорит Челябинск		LL-хондриты
	светлая компонента	темная компонента	
Li	2.06	2.04	2.1
Be	0.036	0.037	0.051
Sc	8.2	8.3	8.4
V	72	75	75
Cr	4000	4400	3740
Co	460	505	490
Ni	11 100	11 500	10 200
Cu	82	103	80
Zn	40	40	46
Ga	4.9	4.8	5
Se	9.9	11.8	9.9
Rb	3.8	3.4	3.1
Sr	11.6	12.0	11.1
Y	2.3	2.2	2
Zr	7.0	9.0	5.9
Mo	1.7	1.2	1.1
Pd	0.54	0.57	0.53
Ag	0.21	0.19	0.072
Ba	9.3	8.8	4.8
La	0.35	0.35	0.315
Ce	0.84	0.95	0.907
Pr	0.13	0.13	0.122
Nd	0.64	0.62	0.659
Sm	0.22	0.23	0.2
Eu	0.10	0.081	0.076
Gd	0.31	0.30	0.303
Tb	0.051	0.052	0.048
Dy	0.36	0.35	0.351
Ho	0.081	0.079	0.077
Er	0.24	0.24	0.234
Tm	0.039	0.036	0.034
Yb	0.26	0.24	0.22
Lu	0.040	0.038	0.033
Hf	0.18	0.25	0.15
Re	0.045	0.046	0.033
Os	0.29	0.31	0.4
Ir	0.25	0.26	0.36
Pt	0.61	0.74	0.85
Au	0.093	0.12	0.14
Pb	0.31	0.57	—
Bi	0.038	0.18	0.016
Th	0.042	0.054	0.043
U	0.012	0.020	0.013

ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ УГЛЕРОДА

Изотопный состав углерода измеряли на масс-спектрометре Delta-Plus. Инструментальная точность составляет 0.02%. Образец метеорита размельчался. Исследуемая проба подвергалась предварительному прогреву при 250°C в течение 15 минут в поддерживаемом вакууме. Затем производилось сжигание пробы при 950°C в течение 30 минут в токе кислорода в реакторе, содержащем CuO. Результаты сообщаются в значениях $\delta^{13}\text{C}$, представляющих отклонение в ‰ отношения $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, исследуемого образца от $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ стандарта PDR (табл. 11).

ТРЕКОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучались треки осколков деления урана и ядер группы железа солнечных космических лучей в кристаллах фосфата и оливина, входящих в состав вещества метеорита Челябинск. Средний размер исследуемых микрокристаллов составляет 100 ± 20 мкм. После химического травления и просмотра около 450 отобранных зерен были получены следующие результаты:

На фоне очень низкой ($\sim 10^3$ трек/см²) плотности треков, характерной для $\sim 95\%$ всех изученных кристаллов оливина, обнаружено около 20 зерен с очень высокой (до $\sim 2 \times 10^7$ трек/см²) плотностью треков, причем в трех из них зафиксирован градиент плотности треков от поверхности вглубь отдельных микрокристаллов. Значения градиентов находятся в интервале (16) 10^6 трек/см² (рис. 10).

Некоторые треки, горизонтально ориентированные относительно травимой поверхности внутреннего среза кристалла, указаны стрелками. Длина их горизонтальной проекции достигает 10–12 микрон. Размеры горизонтальной проекции треков, направленных под большим углом к поверхности травления кристалла, составляют до 3–5 микрон. Идентификационным параметром треков является их хаотическая направленность в объеме кристалла, что позволяет отличать их от разного рода строго ориентированных дислокаций кристаллической решетки.

Источником таких треков могут быть только ядра группы железа ($24 < Z < 28$), входящие в состав солнечных космических лучей с энергией $E \sim (1 - 100)$ МэВ/нуклон и характерным энергетическим спектром, которому соответствует наблюдаемый градиент плотности треков. Аналогичные градиенты плотности треков наблюдаются в кристаллах силикатных минералов, подвергавшихся облучению солнечными космическими лучами во время их нахождения на поверхности лунного реголита и в метеоритах, обогащенных инертными газами солнечного состава.

Таблица 10. Результаты исследования Rb–Sr и Sm–Nd изотопных систем в метеорите Челябинск

Образец	Состав	Rb, ppm	Sr, ppm	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\pm 2\sigma$	Sm, ppm	Nd, ppm	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\pm 2\sigma$
TR0	Порода без стекла	3.20	11.09	0.8399	0.753515	0.000022	0.291	0.870	0.20232	0.512570	0.000019
TR1	Порода, включая стекло	3.22	11.43	0.8179	0.750998	0.000009	0.247	0.788	0.18944	0.512569	0.000011
GG	Серое стекло	3.71	11.68	0.9231	0.750911	0.000021	0.285	0.932	0.18502	0.512488	0.000023
BG	Черное стекло	3.16	11.01	0.8329	0.749790	0.000010	0.257	0.817	0.19016	0.512596	0.000065
LN	ЛФ ($d < 3.3$) немагнитная	12.16	46.8	0.7542	0.753322	0.000007	0.703	2.24	0.19003	0.512561	0.000019
LM	ЛФ ($d < 3.3$) слабомагнитная	10.92	38.0	0.8347	0.754295	0.000007	0.425	1.567	0.16392	0.512519	0.000013
HN	ТФ ($d > 3.3$) немагнитная	3.24	10.59	0.8892	0.751050	0.000010	–	–	–	–	–
NM	ТФ ($d > 3.3$) слабомагнитная	2.49	8.70	0.8312	0.751006	0.000048	0.237	0.740	0.19368	0.512628	0.000018
Стандарты	SRM-987 и J Nd i-1	–	–	–	–	–	–	–	–	0.512128	0.000024
		–	–	–	0.710239	0.000004	–	–	–	0.512105	0.000011
		–	–	–	0.710238	0.000009	–	–	–	0.512108	0.000005
		–	–	–	0.710237	0.000011	–	–	–	0.512118	0.000009

Локальные участки с плотностью треков, варьирующей в пределах $\sim(0.5-20) \times 10^6$ трек/см², относятся к микрокристаллам (средние размеры около 20×20 до 30×50 микрон), образующим данный более крупный кристаллический агрегат. По-видимому, каждый из микрокристаллов, содержащий разную плотность треков, получил разную дозу облучения на поверхности реголита родительского тела метеорита, находясь под слоем экранирующего вещества толщиной не более нескольких микрон. В дальнейшем они были захоронены на субмиллиметровую и затем большую глубину в мелкораздробленном веществе реголита, подвергаясь облучению высокоэнергичными ядрами галактических космических лучей (ГКЛ),

Таблица 11. Изотопный состав углерода образцов метеорита Челябинск

Номер образца	Образец	$\delta^{13}\text{C}$, ‰
66	Светлая компонента	–21.65
		–25.54
		–22.28
		–25.25
		–22.49
65	Темная компонента	–25.27
		–28.46
		–26.68

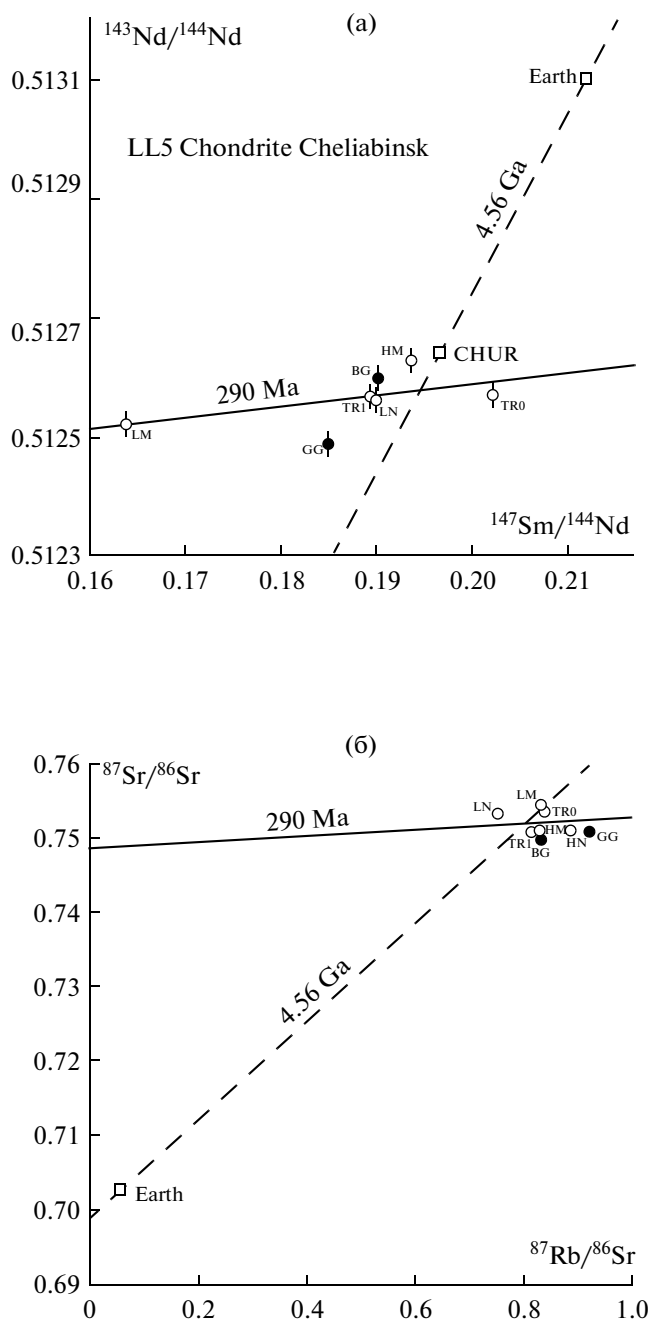


Рис. 9. Изохронные диаграммы для Sm–Nd (а) и Rb–Sr (б) изотопных систем метеорита Челябинск. Залитыми кружками показаны данные для серого стекла (GG) и черного стекла (BG), открытыми – данные для породы в целом и фракций, выделенных по физическим свойствам. Пунктиром на обоих графиках показаны геохроны – линии, отвечающие возрасту 4.56 млрд лет, и линии с наклоном 290 млн лет. В Sm–Nd системе точки несколько растянулись вдоль линии 290 млн лет, тогда как в Rb–Sr системе они образуют относительно компактное облако. CHUR – хондритовый однородный резервуар [3]. На графиках показан также валовый состав силикатной части земли [4].

поток которых на много порядков величины (в зависимости от их энергии) ниже потока ядер VH-группы СКЛ.

В одном кристалле фосфата обнаружены треки осколков деления урана с плотностью треков $\sim 2 \times 10^6$ треков/м².

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты петрографического и химического анализа позволяют с уверенностью отнести метеорит Челябинск к группе LL обыкновенных хондритов.

На диаграмме составов хондритов, определяемых отношением окисленного к восстановленному железу исследуемый метеорит, оказывается в поле LL-хондритов (рис. 11). Состав главных минеральных фаз: оливин ($\text{Fa } 27.9 \pm 0.35$, $N = 22$) и ортопироксена ($\text{Fs } 22.8 \pm 0.79$, $\text{Wo } 1.30 \pm 0.26$, $N = 17$), типичны для LL-хондритов (рис. 12).

В металлической фазе присутствуют камасит ($\text{Ni } 5.15$, $\text{Co } 1.80$ мас. %) и тэнит ($\text{Ni } 35.3$, $\text{Co } 0.86$ мас. %). Троилит содержит 0.33 мас. % Ni. Повышенное содержание Co в камасите характерно для LL хондритов (рис. 13) [5]. Повышенные содержания Mg и S показывают, что в магнитной фракции присутствует примесь троилита и силикатов. В качестве акцессорных присутствуют хромит ($\text{Fe}/\text{Fe} + \text{Mg} = 90$), Cr ($\text{Cr} + \text{AL} = 0.86$ (атомные отношения), ильменит и апатит. Химия хромита характерна для LL хондритов [6].

Незначительные вариации химического состава минеральных фаз и петрографические наблюдения, а именно хорошо выраженные хондры, присутствие единичных зерен клинобронзита и редких ксеноморфных выделений плагиоклаза при преобладании ортопироксена, а также девитрификация стекла при полнокристаллической матрице определяют 5-ый петрологический тип метеорита Челябинск (табл. 12). Следует отметить, что металлическая фаза хондрита Челябинск, за исключением концентрации Co, гораздо ближе по составу металлу неравновесных LL хондритов [7]. Равновесная температура, определенная по оливин-хромитовому термометру составляет 680°C , что соответствует температурам метаморфизма равновесных LL хондритов ($688 \pm 8^\circ\text{C}$) [6].

Отчетливо проявленное мозаичное погасание оливина, развитие планарных элементов и частичная изотропизация плагиоклаза в хондритовой части метеорита при отсутствии фаз высокого давления указывают, согласно классификации Штофлера и др. (Stoffler et al., 1991) [8], на умеренную степень ударного метаморфизма. По совокупности этих свойств в классификации, представленной в табл. 13, по справочнику [9], метеоро-

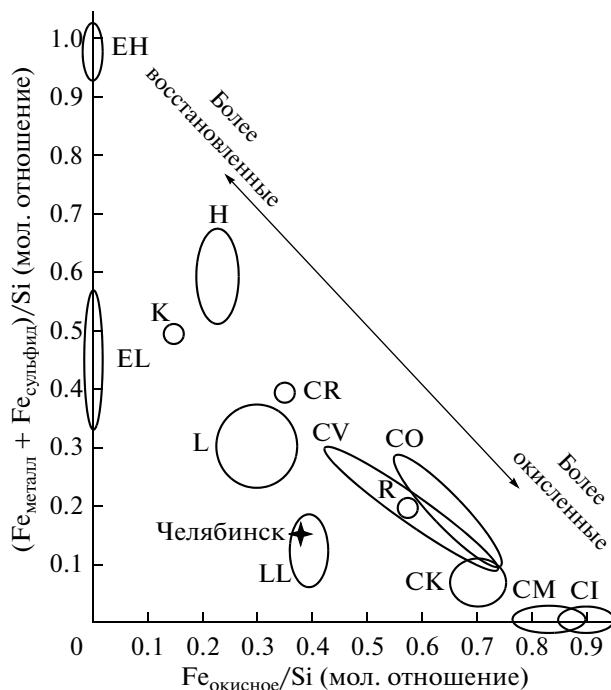


Рис. 11. Диаграмма составов хондритов. Соотношение содержаний восстановленного (металлическое железо + сульфидное) и окисного (FeO) железа, нормированное к содержанию Si. Метеорит Челябинск попадает в поле значений, характерных для LL-хондритов.

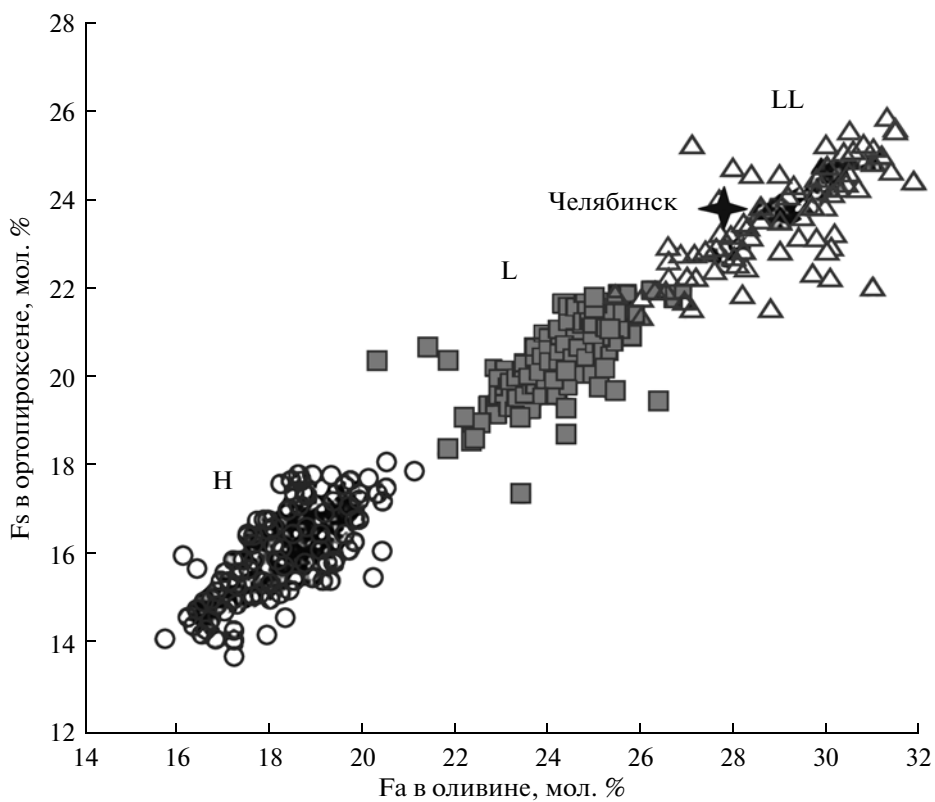


Рис. 12. Составы оливина (Fa) и ортопироксена (Fs) в разных типах обычных хондритов. Составы этих фаз в метеорите Челябинск тяготеют к составам, характерным для LL-хондритов.

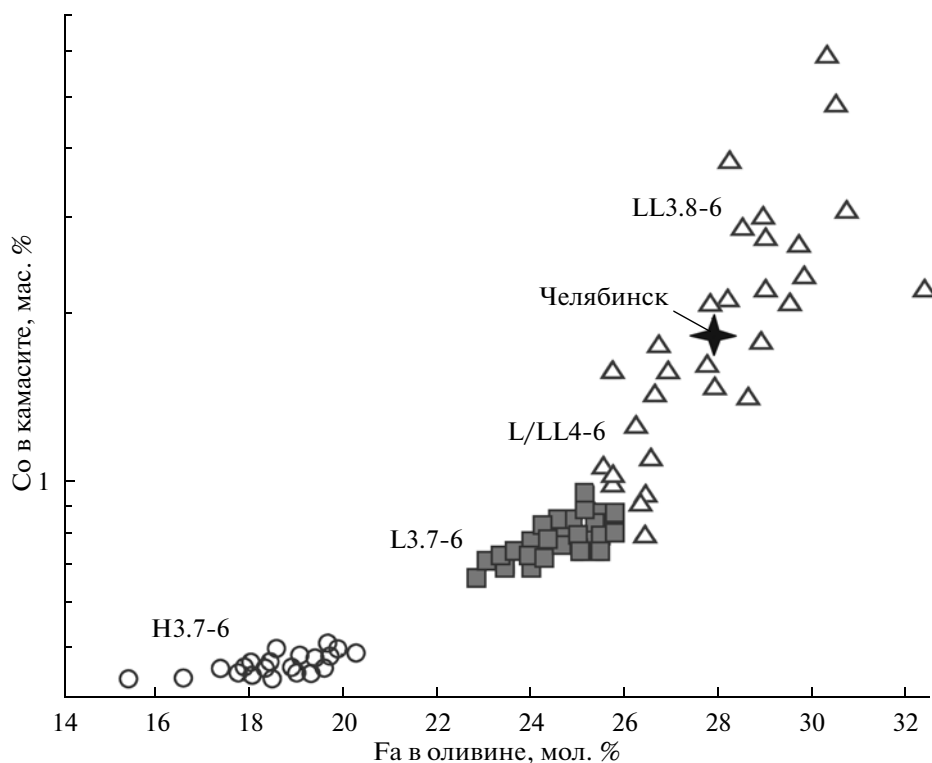


Рис. 13. Содержание кобальта в камасите по отношению к содержанию железа в оливинe для разных типов хондритов.

рит Челябинск должен быть отнесен к ударной фации S4 (ударные нагрузки 25–35 ГПа).

Результаты трекового анализа указывают на присутствие в веществе исследуемого метеорита заметной доли (~5%) вещества, сохранившего следы прямого облучения солнечным ветром.

Подобное облучение могло иметь место как на доаккреционном, так и на реголитном этапе формирования родительского тела метеорита.

Следует отметить, что изотопный состав углерода неоднороден в разных фрагментах метеорита ($\delta^{13}\text{C}$ от -21.48 до -28.46%), хотя в целом величины $\delta^{13}\text{C}$ для метеорита Челябинск находятся в пределах значений $\delta^{13}\text{C}$, характерных для обычных хондритов.

Полученные для метеорита Челябинск Sm–Nd изотопные данные, указывает на относительно событие 290 млн. лет назад, которое могло привести к перераспределению самария и неодима — а значит и остальных редкоземельных элементов — в относительно недавней истории родительского тела метеорита. Возможно, это было время отрыва метеорита от родительского тела. Однако в метеорите сохранились хондры, сложенные различными минералами — оливином, пироксеном — что подразумевает сохранность первичных минералов, образовавшихся из газопылевого облака, и, как следствие, существование различий в величине Sm/Nd отношения в разных точках метеори-

та. Если бы на протяжении предыдущей истории существования материнского тела метеорита имели место широкие пространственные вариации Sm/Nd отношения, то неизбежно в нем должна была появиться и значительная изотопная гетерогенность вследствие радиоактивного распада ^{147}Sm . Кажется маловероятным, чтобы эта гетерогенность могла бы быть уничтожена ударным событием, не приведшем к полному плавлению тела или хотя бы к уничтожению в нем хондр. По-видимому, до ударного события вариации Sm/Nd отношения между разными минералами были невелики и, соответственно, накопленные вариации изотопного отношения неодима также оказались небольшими, в пределах 3 единиц ϵ_{Nd} . Ударное событие, произошедшее около 290 млн. лет назад, по-видимому, привело к локальному метаморфизму части вещества, формированию новых минералов и более широкому фракционированию Sm/Nd отношения.

Rb–Sr изотопные данные не образуют никакого значимого тренда. Наблюдаемый разброс изотопных отношений, по-видимому, отражает воздействие разновозрастных процессов на минералы метеорита, причем поздние ударные события не приводили ни к полной гомогенизации изотопного состава стронция, ни появлению широких вариаций Rb/Sr отношения в различных фазах родительского тела метеорита. Весьма вероят-

Таблица 12. Петрологическая классификация хондритов [9]

Петрографический тип	1	2	3	4	5	6	7
Структура	Хондры отсутствуют	Хондры очень хорошо различимы		Хорошо различимые хондры	Хондры различимы	Плохо различимые хондры	Реликты хондр
Матрица	Очень тонкозернистая непрозрачная	В основном тонкозернистая непрозрачная	Обломочная, отчасти непрозрачная	Крупнозернистая, прозрачная, перекристаллизованная, зернистость увеличивается от типа 4 к типу 7			
Однородность оливина и пироксена по содержанию Fe и Mg		Средняя вариация в содержании Fe > 5%		0–5%	Однородность составов		
Полиморфы пироксена с низким содержанием Ca		В основном моноклинный клинопироксен	Содержание клинопироксена >20%	Содержание клинопироксена <20%	Ортопироксен		
					CaO < 1 мас. %		CaO > 1 мас. %
Полевой шпат		Только первичный, редкий и богатый Ca, вторичный полевой шпат отсутствует	Вторичный полевой шпат очень тонкозернистый, <2 мкм	Тонкозернистый, маленькие вторичные зерна < 50 мкм	Зерна отчетливо видимы и укрупняются от типа 5 к типу 7, зерна >50 мкм		
Стекло в хондрах		Чистое и изотропное	Мутное, девитрифицированное	Стекло отсутствует			
Металл, максимальное содержание Ni		Тэнит редкий или отсутствует, <20 мас. % Ni	Камасит и тэнит (> 20 мас. % Ni) в структурах распада				
Сульфиды, среднее содержание Ni		>0.5 мас. %	<0.5 мас. %				
Содержание H ₂ O (мас. %)	18–20	2–16	0.3–3	< 2			
Содержание углерода (мас. %)	3–5	1.5–2.8	0.1–1.1	< 0.2			
	Гидротермальное изменение ← ← ←		Нет термального равновесия	← ← ← → → →			Термальное равновесие
Температуры метаморфизма			400–600°C	600–700°C	700–750°C	750–950°C	>950°C

но, что в космической истории метеорита могло быть несколько ударных событий, ответственных за наблюдаемую трещиноватую структуру метеорита с обилием прожилков, заполненных переплавленным материалом.

В свою очередь, это привело к нарушению прочности метеороида, и явилось, возможно, причиной ранней фрагментации и наблюдаемого эффекта взрыва при торможении метеорита в верхних слоях атмосферы.

Таблица 13. Ударные фации хондритов [8]

Степень ударного метаморфизма	Эффекты ударного метаморфизма		
	в оливине		в плагиоклазе
S1 практически нет	Четкое погасание, нерегулярная трещиноватость	Угловые изменения позиции погасания: а: низкая < 1° б: высокая 1–2°	Четкое погасание, нерегулярная трещиноватость
S2 очень слабая	Волнистое погасание, нерегулярная трещиноватость	Угловое изменение позиции погасания > 2°	Волнистое погасание, нерегулярная трещиноватость
S3 слабая	Планарная и нерегулярная трещиноватость, волнистое погасание	Число планарных трещин: а: низкая: < 2 б: высокая: > 3	Волнистое погасание
S4 умеренная	Слабый мозаицизм	Планарные трещины и планарные элементы а: низкая: появляется мозаицизм б: высокая: мозаицизм	а: низкая: волнистое погасание б: высокая: частичная изотропизация, планарные элементы
S5 сильная	Сильный мозаицизм, планарные трещины и планарные элементы		Маскелинит
S6 очень сильная	Локально или около расплавных участков		
	Перекристаллизация, побурение, плавление, рингвудит		Ударный расплав (обычное л стекло)
Ударное плавление	Полное плавление (ударно-расплавные породы и расплавные брекчии)		

ВЫВОДЫ

1. Структура, химия минералов и содержание главных элементов показывает, что метеорит Челябинск относится к группе LL5 обыкновенных хондритов и характеризуется умеренной степенью ударного метаморфизма (S4).

2. Метеорит Челябинск содержит значительное (около одной трети объема) количество ударно-расплавленного материала. Ударный расплав по составу близок к основной части метеорита.

3. Исследованные образцы метеорита при общем сходстве с составом LL-хондритов показывают некоторое обеднение платиноидами, обогащение К, Ag, Вi и характеризуются несколько повышенным содержанием тяжелых редкоземельных элементов и Eu.

4. Sm–Nd изотопные данные позволяют предполагать, что ударное событие в истории образования метеорита произошло приблизительно 290 млн. лет назад, однако полной гомогенизации изотопного состава неодима в это время не произошло. Изотопный состав стронция также не был гомогенизирован этим событием (или событиями).

5. Обнаружение в метеорите Челябинск треков ядер элементов группы Fe солнечных космических лучей свидетельствует о том, что часть вещества метеорита могла пребывать на поверхности его родительского тела.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wasson J.T., Kallemeyen B.W.* Composition of chondrites // *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 1988. V. A325. P. 535–544.
2. *Jarosewich E.* Chemical analyses of meteorites: A compilation of stony and iron meteorite analyses // *Meteoritics*. 1990. V. 35. P. 323–337.
3. *Jacobsen S.B., Wasserburg G.J.* Sm–Nd isotopic evolution of chondrites // *Earth and Planetary Science Letters*. 1980. V. 50. P. 139–155.
4. *Костицын Ю.А.* Sm–Nd и Lu–Hf изотопные системы Земли: отвечают ли они хондритам? // *Петрология*. 2004. Т. 12. № 5. С. 451–466.
5. *Rubin A.E.* Kamacite and olivine in ordinary chondrites: intergroup and intragroup relationships // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1990. V. 54. P. 1217–1232.
6. *Wlotzka F.* Cr spinel and chromite as petrogenetic indicators in ordinary chondrites: Equilibration temperatures of petrologic types 3.7 to 6 // *Meteoritics & Planet. Sci.* 2005. V. 40. P. 1673–1702.
7. *Kong P., Ebihara M.* The origin and nebular history of the metal phase of ordinary chondrites // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1997. V. 61. P. 2317–2329.
8. *Stoffler D., Keil K., Scott E.R.D.* Shock metamorphism in ordinary chondrites // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1991. V. 55. P. 3845–3867.
9. *Lodders K., Fegley B.* The planetary Scientific companion. N.Y.: Oxford Univ. Press, 1998. 371 p.

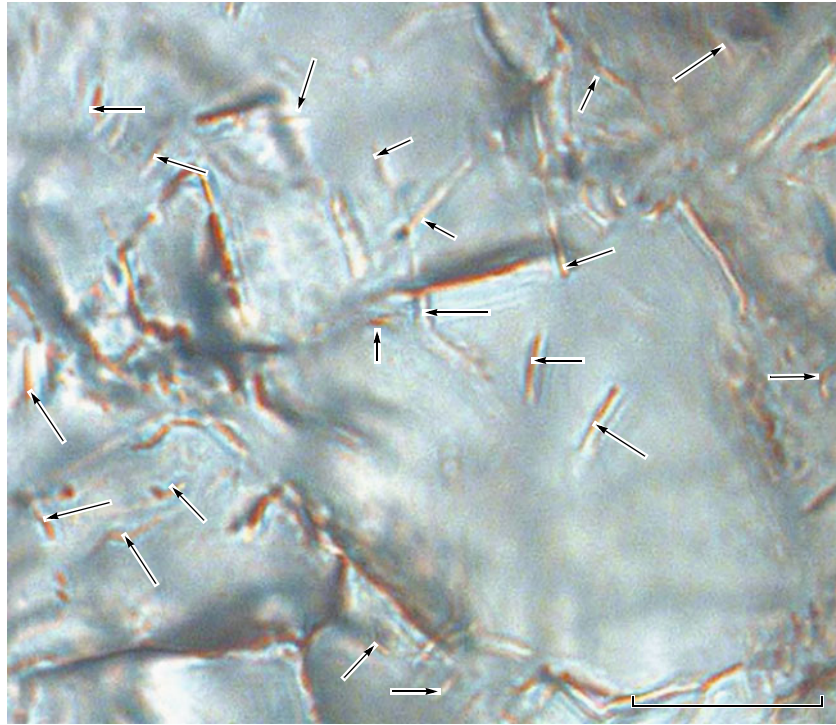


Рис. 10. Микрофотография кристаллов оливина, содержащего треки от ядер группы железа (VH – группа ядер) солнечных космических лучей (энергия $E \leq 100$ МэВ/нуклон, полная длина пробега в оливине меньше 100 микрон). Некоторые горизонтально ориентированные треки отмечены стрелками. Указан масштабный отрезок 20 микрон.